

STABILISASI SLUDGE DARI INSTALASI PENGOLAHAN AIR LIMBAH (IPAL) MENGGUNAKAN STARTER BAKTERI INDIGENOUS PADA AEROBIC SLUDGE DIGESTER

STABILIZATION OF SLUDGE FROM WASTEWATER TREATMENT PLANT (WWTP) BY USING INDIGENOUS BACTERIA STARTER IN AEROBIC SLUDGE DIGESTER

Titi Candra Sunarti^{*)}, Suprihatin, dan Ramiza Dewaranie Lauda

Departemen Teknologi Industri Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor
Kampus IPB Dramaga, Kotak POS 220, Bogor 16002
Email: titi-cs@ipb.ac.id

ABSTRACT

Sludge stabilization is degradation process for the organic components into simpler compounds, and to eliminate toxic compounds and volatile compounds that cause the unpleasant smell by activities of some microorganisms. Proteolytic and cellulolytic bacteria are predominant and indigenous microorganisms that play an important role in the degradation of organic components on activated sludge. The aim of this study was to stabilize sludge that can be used for fertilizer production by using various types of indigenous bacterial isolated from industrial biological wastewater as starter, as well as determine the effect of aeration time for 30 days on the characteristics of sludge stabilization. The research investigated the effect of starter addition, from indigenous bacteria isolates, as (1) proteolytic bacteria, (2) cellulolytic bacteria, and (3) no starter addition as control. The process of degradation by indigenous microorganisms capable on removing nitrogen compounds such as ammonium to nitrate. The result showed that all bacteria starter have high capability to accelerate the degradation of organic compound, but not significantly in the stabilization period. The addition of proteolytic bacteria increase the breakdown of protein compound into ammonium, while cellulolytic bacteria increasing the formation of total suspended solids (TSS), volatile suspended solids (VSS), total COD, and soluble COD compared to the control. The addition of cellulolytic bacteria showed the highest value of C/N ratio (9.17) compared to the others (7.12 - 8.97).

Key words: sludge stabilization, organic components, indigenous bacteria starter, proteolytic, cellulolytic.

ABSTRAK

Stabilisasi *sludge* merupakan proses degradasi komponen organik menjadi senyawa yang lebih sederhana, serta menghilangkan senyawa toksik dan mengeliminasi senyawa volatil yang menimbulkan aroma tidak sedap dengan memanfaatkan berbagai macam mikroorganisme. Bakteri proteolitik dan selulolitik merupakan mikroorganisme *indigenous* yang dominan dan berperan penting dalam degradasi komponen organik pada lumpur aktif. Penelitian ini bertujuan untuk menangani (menstabilkan) *sludge* agar dapat dimanfaatkan untuk pembuatan pupuk dengan menggunakan beberapa isolat bakteri *indigenous* yang berasal dari limbah cair biologis dari industri pangan sebagai starter cair, serta mengetahui pengaruh lama aerasi selama 30 hari terhadap karakteristik stabilisasi *sludge*. Perlakuan yang diberikan terdiri atas tiga macam perlakuan (1) penambahan starter isolat bakteri *indigenous* proteolitik, (2) penambahan starter bakteri *indigenous* selulolitik, dan (3) tanpa penambahan starter sebagai kontrol. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa semua starter bakteri *indigenous* mempunyai kemampuan untuk mempercepat degradasi komponen organik yang tinggi, tetapi tidak berpengaruh nyata dalam mempercepat periode proses stabilisasi. Penambahan starter bakteri proteolitik meningkatkan tingkat konversi protein menjadi ammonium, sedangkan penambahan starter bakteri selulolitik mampu meningkatkan penyisihan nilai *total suspended solids* (TSS), *volatile suspended solid* (VSS), *total COD*, dan *soluble COD* dibandingkan dengan kontrol. Penambahan starter bakteri selulolitik mampu menghasilkan rasio C/N yang lebih tinggi (9.17) dibandingkan dengan perlakuan lainnya (7.12 – 8.97).

Kata kunci: stabilisasi *sludge*, komponen organik, starter bakteri *indigenous*, proteolitik, selulolitik.

^{*)} Penulis untuk korespondensi

PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi pencegahan pencemaran lingkungan oleh industri saat ini lebih banyak diarahkan pada pencegahan secara internal yaitu dengan cara menerapkan teknologi produksi bersih. Namun, dengan menerapkan teknologi pencegahan internal tidak berarti limbah dapat langsung dibuang ke lingkungan, tetapi masih diperlukan pengolahan limbah yang dikombinasikan dengan pengolahan limbah secara eksternal (*end of pipe*) dengan mendirikan sistem Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) untuk mencapai baku mutu air limbah yang dipersyaratkan oleh pemerintah. Baku mutu air limbah bagi kegiatan industri diatur dalam Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup Kep. 51/MENLH/101/1995. Adanya pengaturan ini untuk pengontrolan kegiatan pembuangan air limbah yang tidak melampaui daya dukung lingkungan penerimanya.

PT. XXX Indonesia adalah perusahaan makanan multi nasional dengan produk utama berupa kecap manis, kecap asin, dan minuman ringan. Limbah yang dihasilkan selama proses produksi adalah limbah cair, padat, dan gas. Limbah cair yang dihasilkan antara lain berasal dari limbah produksi, serta limbah domestik. Pengolahan air limbah dilakukan pada sistem IPAL (Instalasi Pengolahan Air Limbah) yang terdiri atas 3 unit proses utama yaitu (1) proses fisik yang dilakukan dengan pengendapan dan penyaringan padatan kasar yang tersuspensi dalam air limbah, (2) proses kimiawi yang dilakukan dengan metode koagulasi dan flokulasi air limbah yang bertujuan untuk pengaturan pH air limbah dan memudahkan pengendapan padatan terlarut dalam air limbah dengan pembentukan flok, (3) proses biologis yang dilakukan dengan metode lumpur aktif dengan tujuan untuk mengurangi komponen organik terlarut dengan pendegradasian oleh mikroorganisme *indigenous*.

Proses lumpur aktif merupakan proses penanganan air limbah secara biologis menggunakan bantuan mikroorganisme *indigenous* yang tumbuh secara alami pada air limbah tersebut. Proses pengolahan lumpur aktif yang dilakukan pada PT. XXX Indonesia terjadi dalam IPAL menggunakan reaktor *Cyclic Sequencing Aerobic System* (CSAS). Pada CSAS Tank, terdapat tiga tahapan yaitu tahap aerasi dan pemberian nutrisi (NPK) untuk menjaga efektivitas pendegradasian material organik terlarut oleh mikroorganisme *indigenous*, tahap pengendapan (*settling*) sehingga didapatkan *sludge* tersuspensi, dan tahap pembuangan air limbah (*effluent*) ke badan sungai penerima. *Critical Control Point* (CCP) yang terdapat dalam pengolahan lumpur aktif terjadi pada tahap aerasi yaitu keterjaminan kecukupan oksigen terlarut (*Dissolve Oxygen*) dan pemberian nutrisi (NPK) sehingga lumpur (*sludge*) yang tersuspensi dalam air limbah dapat mengendap dengan baik.

Pada proses pengolahan lumpur aktif ini, hasil utama yang diperoleh berupa padatan (*sludge*) yang mengandung biomassa dan air limbah. Proses penanganan limbah cair dilanjutkan dengan pemisahan

antara *sludge* dengan air limbah menggunakan proses pengepresan pada *belt press* sehingga terpisah antara lumpur dan air limbah. *Belt press* berfungsi mengurangi kadar air dalam lumpur dengan cara pengepresan dan memperoleh padatan lumpur agar air buangan limbah dapat memiliki nilai TSS (*Total Suspended Solid*) yang rendah dan layak dibuang ke badan sungai.

Berdasarkan hasil pengamatan di lapangan, didapatkan bahwa lumpur yang dibuang setelah proses *pressing* memiliki masalah tumbuhnya kapang. Hal ini mengindikasikan bahwa lumpur masih mengandung senyawa organik kompleks sehingga proses pendegradasian nutrisi yang dilakukan oleh mikroorganisme *indigenous* belum selesai. Kondisi lumpur yang demikian ini akan menghambat rencana perusahaan dalam upaya pembuatan nilai tambah sebagai pupuk untuk produk CSR (*Corporate Social Responsibility*), sehingga perusahaan dapat mensinergikan kegiatan penanganan limbah menjadi suatu program yang dapat berdampak meluas dan dirasakan secara langsung oleh lingkungan sosial sekitar.

Oleh karena itu, untuk mencapai tujuan tersebut diperlukan kombinasi penanganan lumpur menggunakan proses-proses biologis (degradasi senyawa kompleks dengan mikroorganisme *indigenous*) dan pemberian aerasi yang kontinu (*aerobic sludge digester*) sehingga didapatkan kestabilan kandungan lumpur agar siap untuk dikembangkan menjadi pupuk. Menurut Al-Ghusain *et al.* (2002), stabilisasi *sludge* menggunakan proses aerobik berupa oksidasi biomassa (nitrifikasi) yang menghasilkan CO₂, H₂O, dan hasil dari proses transformasi nitrogen berupa ion amonium (NH₄⁺) dan nitrat (NO₃⁻). Penggunaan mikroorganisme *indigenous* dipilih untuk mendapatkan kultur isolat mikroorganisme agen pendegradasian komponen kompleks dalam *sludge*, yang memiliki kemampuan adaptasi lebih baik dibandingkan dengan menggunakan kultur isolat mikroorganisme baru.

BAHAN DAN METODE

Bahan dan Alat

Bahan utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah *sludge* dari lumpur aktif IPAL industri pangan PT. XXX Indonesia. Lumpur aktif yang didapatkan diperoleh pada saat proses *settling* (pengendapan). Bahan lain berupa media spesifik untuk isolasi bakteri *indigenous* dan pertumbuhan mikroba berupa yaitu PCA (*Plate Count Agar*, Merck), PDA (*Potato Dextrose Agar*, Merck), CMC Agar (Difco), Nutrien Broth (Merck), *Skimmed Milk Agar* (Difco), Tributirin Agar (Difco), *Starch Agar* (Difco), garam fisiologis dan bahan-bahan kimia untuk analisis.

Alat yang digunakan untuk degradasi dan stabilisasi *sludge* adalah reaktor aerobik dari bak kaca berukuran 20 x 20 x 60 cm³, dan instrumen untuk analisis meliputi spektrofotometer, pH meter, DO meter, COD reaktor, penyaring vakum, *clean bench*, *water bath*

shaker, inkubator bakteri (37°C), *colony counter*, oven 105°C, tanur, dan autoclaf.

Metode

Karakterisasi Sludge

Karakterisasi *sludge* meliputi kandungan komponen hara makro (nitrogen, fosfor, kalium), C/N rasio, komponen proksimat (kadar air, kadar abu, kadar protein, kadar lemak, kadar serat kasar, dan kadar karbohidrat), dan total gula sederhana. Prosedur analisis hara sesuai dengan metoda APHA (2005), Analisis proksimat sesuai AOAC (1995). Sebagai langkah awal untuk memulai pemanfaatan *sludge* dilakukan juga uji potensi kandungan bahan berbahaya dan beracun (B3) menggunakan uji LD₅₀.

Dinamika Populasi dan Isolasi Mikroorganisme Indigenous pada Stabilisasi Sludge secara Spontan

Mikroorganisme *indigenous* pada *sludge* merupakan mikroorganisme yang sudah tumbuh secara alami. Pada tahap ini, *sludge* digunakan sebagai substrat tanpa pengenceran. Pertumbuhan mikroorganisme diamati selama 4 hari inkubasi, yang meliputi pertumbuhan bakteri, kapang dan khamir. Perhitungan jumlah mikroorganisme untuk bakteri spesifik digunakan media spesifik sebagai berikut : bakteri selulolitik (CMC agar, Merck), bakteri amilolitik (*Starch* agar, Difco), bakteri lipolitik (Tributirin agar, Difco), dan bakteri proteolitik (*Skimmed Milk* agar, Difco). Dari tahap ini, akan diperoleh kultur isolat mikroorganisme yang mendominasi pertumbuhan yang kemudian akan digunakan sebagai starter untuk mendegradasi *sludge* pada tahap selanjutnya. Perhitungan jumlah mikroorganisme ditentukan setelah 24 jam inkubasi. Koloni mikroba yang mendominasi pada dinamika populasi diisolasi dan dijadikan sebagai isolat untuk pembuatan starter cair.

Penyiapan Starter Cair Mikroorganisme Indigenous

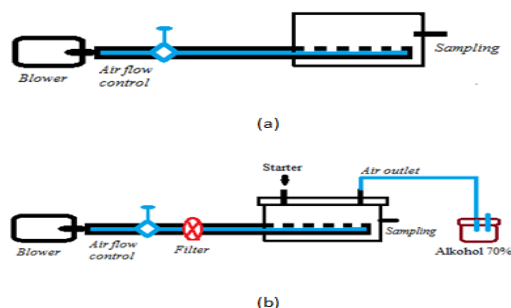
Kultur isolat yang telah diperoleh dari tahap sebelumnya, ditentukan kurva turbiditas untuk menetapkan fase eksponensial kultur. Kultur isolat selulolitik ditumbuhkan pada CMC broth, sedangkan kultur isolat proteolitik ditumbuhkan pada *Skimmed Milk* broth, yang diinkubasikan pada suhu 37°C untuk diamati pertumbuhannya melalui pengukuran Optical Density (OD) pada λ 600 nm. Pengamatan dilakukan pada jam ke-0 s/d jam ke-9, dan 24 jam.

Starter cair disiapkan dengan menambahkan inokulum bakteri proteolitik dan selulolitik yang telah mencapai μ_{maks} ke dalam *sludge*. Jumlah inokulum bakteri proteolitik dan selulolitik pada inokulum bakteri proteolitik 1, inokulum bakteri proteolitik 2, dan inokulum bakteri selulolitik yang ditambahkan masing-masing sebesar 8.1×10^9 , 7.0×10^9 , dan 5.2×10^9 CFU/mL *sludge*. Inokulum tersebut ditambahkan ke dalam *sludge* sebanyak 0.1% (v/v) dari *sludge* sehingga

konsentrasi bakteri proteolitik dan selulolitik pada *sludge* sebesar 10^6 CFU/mL *sludge*.

Stabilisasi Sludge Menggunakan Starter Cair

Proses stabilisasi *sludge* digunakan reaktor *aerobic digester* diatur dengan konsentrasi oksigen terlarut (DO) ≥ 2.00 mg/L. Pada penelitian ini disiapkan 6 buah reaktor berkapasitas 20 L yang dioperasikan secara *batch*. Perlakuan terdiri atas: (1) tanpa penambahan starter (reaktor kontrol), (2) dengan penambahan starter isolat bakteri *indigenous* proteolitik, dan (3) penambahan starter bakteri *indigenous* selulolitik. Masing-masing perlakuan dilakukan dengan 2 kali ulangan. Untuk reaktor kontrol, proses berlangsung secara spontan. Udara yang dialirkan tidak melewati membran filter, dan outlet udara terbuka secara bebas, sedangkan pada reaktor dengan penambahan starter, aliran udara dilewatkan pada membran filter, dan outlet udara ditampung pada larutan etanol 70% agar proses stabilisasi berlangsung secara aseptis. Adapun gambaran set-up reaktor *aerobic digester* tersaji pada Gambar 1.



Gambar 1 Set-up reaktor *aerobic digester* (a) reaktor kontrol, (b) reaktor perlakuan

Starter bakteri selulolitik dan proteolitik disiapkan dengan media CMC broth dan *Skimmed Milk* broth yang berada pada fase eksponensial. Starter yang digunakan sebanyak 0.1 % (v/v) setara dengan 10^6 CFU/mL *sludge*, diinokulasikan pada hari ke-10. Pengamatan dilakukan setiap 5 hari hingga 30 hari, yang meliputi analisis jumlah mikroorganisme (bakteri selulolitik dan proteolitik) dan total gula. Proses stabilisasi *sludge* juga memantau perubahan parameter terhadap pH, amonium, nitrat, *total suspended solid* (TSS), *volatile suspended solid* (VSS), tingkat penyisihan VSS, COD_{total}, dan COD_{soluble} dari hari ke-0 hingga hari ke-30 yang tercantum dalam APHA (2005).

Potensi Aplikasi Produk Hasil Stabilisasi Sludge

Potensi penerapan metode stabilisasi *sludge* bagi industri pangan terkait dengan mengukur seberapa besar pengaruh ketiga macam perlakuan yang diberikan yaitu stabilisasi tanpa penambahan starter, stabilisasi dengan penambahan starter isolat bakteri *indigenous* proteolitik, dan stabilisasi dengan penambahan starter isolat bakteri *indigenous* selulolitik terhadap karakteristik mutu pupuk. Pengujian yang dilakukan meliputi kandungan

C/N ratio, nitrogen, fosfor, dan kalium sehingga akan didapatkan *sludge* yang paling siap untuk dikembangkan menjadi pupuk.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik *Sludge*

Limbah cair didefinisikan sebagai limbah dalam wujud cair yang dihasilkan oleh kegiatan industri yang dibuang ke lingkungan dan diduga dapat menurunkan kualitas lingkungan (KepMenLH No 51/1998). Kandungan limbah cair didominasi oleh air beserta kontaminan (padatan terlarut) atau bahan-bahan cair seperti minyak, residu senyawa-senyawa kimia, dan lain sebagainya.

Pengolahan limbah cair secara biologis menggunakan berbagai macam mikroorganisme yang mengubah padatan yang tersuspensi (koloid) dan karbon organik terlarut menjadi senyawa volatil dan biosolid (*sludge*). Pengujian karakteristik *sludge* dilakukan untuk mendapatkan seberapa besar kandungan bahan berbahaya beracun (B3). Menurut pengujian yang dilakukan oleh perusahaan berdasarkan kandungan senyawa toksik LD₅₀ (mg/kg) menunjukkan bahwa *sludge* tidak mengandung komponen berbahaya karena memiliki LD₅₀ > 15 000 mg/kg dengan nilai LD₅₀ sebesar 19 945,68 mg/kg.

Kandungan hara makro pada *sludge* memiliki nitrogen sebesar 0.66%, fosfor sebesar 0.18%, kalium sebesar 0.17% dan C/N ratio sebesar 9.25. Apabila data tersebut dibandingkan dengan standar pupuk menurut BSN (2004) dalam SNI No 19-7030-2004 menunjukkan bahwa *sludge* berpotensi untuk dijadikan sebagai bahan baku dalam pembuatan pupuk. Akan tetapi, komponen senyawa organik yang diperoleh dari analisis komponen proksimat yang meliputi kadar air, protein, serat kasar, dan gula sederhana masih tinggi sehingga menyebabkan pertumbuhan kapang pada *sludge* setelah di-*pressing*.

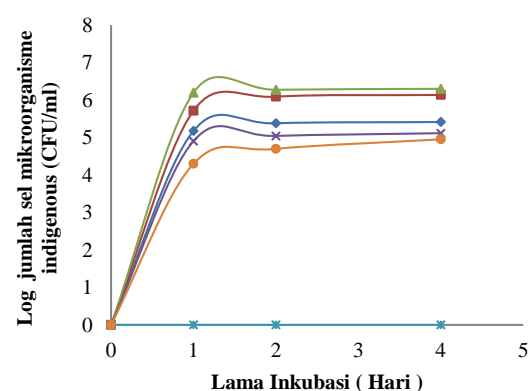
Tabel 1. Karakteristik *sludge*

Parameter	Satuan	Hasil	SNI 19-7030-2004
1. Hara makro			
Nitrogen	% b.b	0.66	min 0.4
Fosfor	% b.b	0.18	min 0.1
Kalium	% b.b	0.17	min 0.2
C/N Ratio	-	9.25	10-20
2. Analisis proksimat			
Air	% b.b	82.24	-
Abu	% b.b	6.11	-
Protein Kasar	% b.b	4.12	-
Lemak Kasar	% b.b	0.016	-
Serat Kasar	% b.b	5.82	-
Karbohidrat (by different)	% b.b	1.69	-
3. Kandungan gula			
Gula Sederhana	mg/kg	347.82	-

Menurut Eckenfelder (2000) pengelolaan limbah cair pada industri harus fokus dalam menghilangkan berbagai macam senyawa berbahaya pada komponen limbah, salah satunya berupa senyawa organik terlarut yang akan menyebabkan terjadinya deplesi oksigen terlarut, kualitas senyawa organik terlarut akan mengakibatkan kemampuan badan air untuk mendegradasi secara alamiah menjadi terbatas. Teknologi pengolahan secara biologi air limbah dimanfaatkan sebagai dasar untuk mendegradasi senyawa organik yang terlarut dalam limbah cair menggunakan berbagai jenis mikroorganisme untuk mengubahnya menjadi *sludge*. Hal ini disebabkan *sludge* memiliki berat jenis yang lebih besar dari pada air sehingga mengendap (Davis 2010). Dengan demikian, penggunaan proses stabilisasi komponen organik dengan menggunakan beberapa mikroorganisme dapat menghilangkan nutrien, khususnya nitrogen dan fosfor yang akan menghindari terjadinya dominasi pertumbuhan alga (eutrofikasi) yang akan berdampak pada penyempitan badan sungai.

Dinamika Populasi dan Isolasi Mikroorganisme *Indigenous*

Setiap spesies mikroorganisme akan tumbuh dengan baik di dalam lingkungannya hanya selama kondisi lingkungannya menguntungkan bagi pertumbuhannya dan untuk mempertahankan dirinya. Berdasarkan Gambar 2, dinamika populasi mikroorganisme *indigenous* pada *sludge* diidentifikasi terdiri atas mikroorganisme jenis bakteri, kapang dan khamir, mikroorganisme dengan sifat selulolitik (pemecah selulosa), sifat proteolitik (pemecah protein), sifat amilolitik (pemecah amilum), dan sifat lipolitik (pemecah lemak).



Gambar 2 Dinamika populasi dari pertumbuhan spontan mikroba *indigenous*

— Bakteri — Selulolitik — Proteolitik
— Amilolitik — Lipolitik — Kapang

Davis (2010) menjelaskan bahwa bakteri dengan sifat aerobik kemoheterotrof merupakan populasi terbesar dalam *wastewater treatment plant*

(WWTP) khususnya pada pengolahan air limbah secara biologis. Setiap sel bakteri *indigenous*, menggunakan *soluble nutrient* yang terkandung dalam air limbah untuk pertumbuhannya. Karena bentuknya berukuran sangat kecil (*surface area per unit mass*), maka bakteri melakukan metabolisme substrat lebih cepat, populasi bakteri akan mendominasi kapang, kapang akan mendominasi protozoa.

Dinamika populasi mikroorganisme sangat dipengaruhi oleh keberadaan nutrisi untuk kelangsungan hidup mikroorganisme. Semua jenis mikroorganisme membutuhkan air, sumber energi, karbon, nitrogen, dan mineral serta oksigen jika mikroorganisme aerobik. Berdasarkan informasi dari Tabel 1, diperoleh bahwa kandungan sludge adalah kadar air sebesar 82.24% (b.b), kadar protein sebesar 4.12% (b.b), kandungan serat kasar sebesar 5.82% (b.b) dan kandungan lemak sebesar 0.016 % (b.b). Informasi tersebut menunjukkan masih tersisa komponen organik kompleks yang dapat dijadikan substrat oleh mikroorganisme dalam pertumbuhan alamnya.

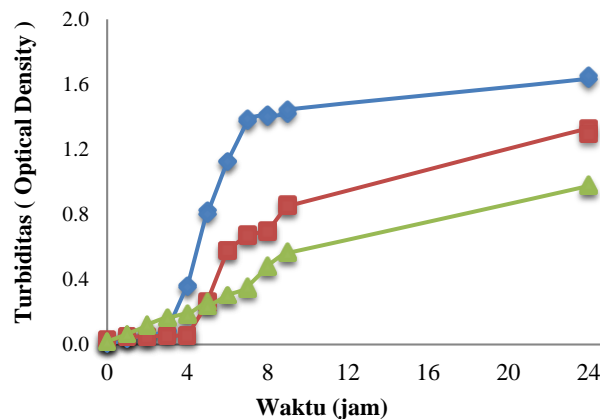
Pada Gambar 2, diidentifikasi populasi pertumbuhan bakteri lebih besar dibandingkan populasi pertumbuhan kapang. Hal ini disebabkan, daya adaptasi bakteri pada lingkungan dengan kadar air yang tinggi sebesar 80-90 % (b.k) lebih baik dibandingkan dengan kapang. Kapang lebih tahan pada kondisi kering dan menyukai kondisi lingkungan yang asam. Kandungan serat kasar dan protein yang besar akan berbanding lurus dengan jumlah bakteri dengan sifat selulolitik dan proteolitik. Sedangkan kandungan lemak yang rendah menyebabkan bakteri dengan sifat lipolitik memiliki pertumbuhan yang rendah. Hal ini menunjukkan adanya korelasi antara jumlah nutrisi sangat berpengaruh terhadap pertumbuhan mikroba dengan sifat spesifik memiliki hubungan yang berbanding lurus. Berdasarkan pengukuran dinamika populasi, diperoleh bahwa log jumlah mikroorganisme *indigenous* yang dominan berupa mikroorganisme bersifat proteolitik dan selulolitik yang masing-masing berjumlah 6.29×10^5 CFU/mL *sludge* dan 6.14×10^5 CFU/mL *sludge* pada saat inkubasi hari ke-4.

Penyiapan Starter Cair Mikroorganisme Indigenous

Isolasi bakteri *indigenous* dalam lumpur aktif yang diambil dari IPAL PT. XXX Indonesia pada tahapan pengolahan air limbah secara biologis. Kultur isolat bakteri *indigenous* yang berhasil didapatkan terdiri atas kultur isolat proteolitik-1 (isolat 1), kultur isolat proteolitik-2 (isolat 2), dan kultur isolat selulolitik (isolat 3).

Kurva turbiditas bakteri *indigenous* proteolitik dan selulolitik dengan diukur untuk menentukan fase eksponensial bakteri *indigenous* proteolitik dan selulolitik. Bakteri *indigenous* proteolitik dan selulolitik mencapai kecepatan spesifik maksimum (μ_{maks}) pada jam ke-5 (isolat 1), jam ke-7 (isolat 2) dan jam ke-8 (isolat 3). Bakteri *indigenous* proteolitik masih berada pada fase lag pada jam ke-0 hingga jam ke-4. Kemudian berada pada fase eksponensial setelah jam ke-4 hingga jam ke-7 dan memasuki fase pertumbuhan diperlambat

setelah jam ke-7. Sedangkan bakteri selulolitik berada fase lag saat jam ke-0 hingga jam ke-3. Kemudian bakteri selulolitik berada pada fase eksponensial setelah jam ke-3 hingga jam ke-8 dan memasuki fase pertumbuhan diperlambat setelah jam ke-8. Starter bakteri proteolitik dan selulolitik siap digunakan untuk degradasi *sludge* saat bakteri mencapai kecepatan spesifik maksimum (μ_{maks}). Adapun kurva turbiditas bakteri proteolitik dan selulolitik disajikan pada Gambar 3.



Gambar 3 Kurva turbiditas isolat bakteri *indigenous* menggunakan media cair spesifik *skimmed milk-broth* isolat 1 (—●—), isolat 2 (—■—) dan *CMC-broth* untuk isolat 3 (—▲—).

Berdasarkan informasi dari Gambar 2, diperoleh bahwa pertumbuhan mikroorganisme sudah terjadi pada inkubasi 24 jam. Hal ini menunjukkan bahwa pertumbuhan mikroorganisme *indigenous* berlangsung cepat. Sehingga, kurva turbiditas dari mikroorganisme *indigenous* dominan berupa bakteri proteolitik dan bakteri selulolitik pada jam pertama sudah menunjukkan pertumbuhan walaupun masih dalam tahapan adaptasi (fase lag). Kultur isolat bakteri *indigenous* proteolitik dan selulolitik yang digunakan untuk pembuatan starter, diperoleh dari seleksi isolat unggul yang ditumbuhkan dalam media spesifik dengan menggunakan teknik pengenceran serial dari biakan murni (mikroorganisme *indigenous* dalam *sludge*).

Stanbury dan Whitaker (1984) menjelaskan starter yang baik harus memenuhi kriteria (1) terdiri dari mikroba aktif yang dapat meminimalkan fase lag, (2) mikroba harus tersedia dalam jumlah yang cukup sehingga memenuhi ukuran optimum starter (3-10% v/v), (3) kondisi fermentasi harus bebas dari kontaminasi, (4) berada dalam morfologi yang sesuai, dan (5) mampu membentuk produk yang tetap. Artinya, kemampuan mikroba untuk dijadikan starter yang baik sangat bergantung dari pilihan menggunakan media pertumbuhan.

Lumpur aktif adalah produk pengolahan limbah cair secara biologis yang berasal dari IPAL industri. Davis (2010) melakukan penelitian menggunakan *mixed culture growth* untuk mengetahui komunitas mikroorganisme yang berada pada limbah

cair industri. Berdasarkan penelitian tersebut diketahui bahwa faktor utama dalam dinamika variasi populasi mikroba adalah kompetisi untuk mendapatkan substrat (komponen organik). Faktor kedua yang terpenting adalah faktor keberadaan predator. Ketika ketersediaan substrat berupa *soluble organic* menjadi terbatas, maka populasi bakteri dalam bereproduksi menjadi terhambat dan populasi predator meningkat. Davis (2010) menambahkan, dalam kondisi sistem tertutup dimana dengan inokulum yang ada, bakteri akan mengalami pertumbuhan yang meningkat, kemudian mengalami pertumbuhan stationer hingga penurunan, substrat yang tersisa dekomposisi kembali oleh bakteri yang berbeda.

Proses degradasi secara spontan membutuhkan waktu degradasi yang lama. Penambahan starter cair bakteri proteolitik dan selulolitik pada proses degradasi lumpur diharapkan dapat meningkatkan laju degradasi yang terjadi. Peningkatan laju degradasi tersebut akan mempersingkat waktu degradasi sehingga waktu untuk proses stabilisasi *sludge* menjadi lebih cepat dan stabil. Proses degradasi pada penelitian ini menggunakan starter cair bakteri *indigenous* proteolitik dan selulolitik.

Stabilisasi *Sludge* Menggunakan Starter Cair

Aerobic digestion umumnya dapat diaplikasikan untuk menstabilkan *secondary treatment sludge* (lumpur aktif). Hal ini disebabkan, lumpur aktif mengandung padatan biologis yang dominan dan sangat penting untuk mendegradasi lumpur aktif tersebut. Untuk penanganan lumpur dari *primary treatment* lebih ekonomis menggunakan *anaerobic digestion* karena sebagian besar komponennya terdiri dari non-mikroba organik sehingga harus dikonversi ke bentuk biomasa. Penyediaan oksigen terlarut agar memenuhi persyaratan DO (*dissolve oxygen*) ≥ 2.00 mg/L digunakan *air blower* yang umumnya dimanfaatkan untuk aerasi kolam. Pertimbangan menggunakan *blower* selama proses stabilisasi berlangsung (15-30 hari) adalah kemampuan kontinuitas pasokan aerasi. Pengukuran DO awal rata-rata pada reaktor kontrol, reaktor dengan penambahan starter proteolitik dan reaktor dengan penambahan starter selulolitik secara berturut-turut sebesar 2.97 mg/L, 3.02 mg/L, dan 2.91 mg/L. Pengecekan DO awal ini bertujuan untuk memastikan suplai oksigen sudah merata dan DO sesuai.

Proses dekomposisi padatan terlarut secara aerobik sangat bergantung pada *dissolved oxygen* (DO). Ketika ketersediaan oksigen tercukupi, maka mikroba akan menangkap energi tersebut menggunakan elektron aseptor yang berupa oksigen. Energi tersebut diperoleh dari proses transfer energi yang dilakukan oleh elektron *carrier*. Ketersediaan energi ini, digunakan untuk pertumbuhan mikroba aerob (Rittman dan McCarty 2001). Stanbury dan Whitaker (1984) menambahkan jika *dissolved oxygen* kurang dari *critical dissolved oxygen* (0.004 - 0.022 mg/L) maka proses metabolisme mikroba akan terganggu. Dengan demikian, pemberian aerasi dilakukan untuk pengoptimuman kinerja mikroba.

Stanbury dan Whitaker (1984) menjelaskan dalam pendesainan fermentor harus mempertimbangkan

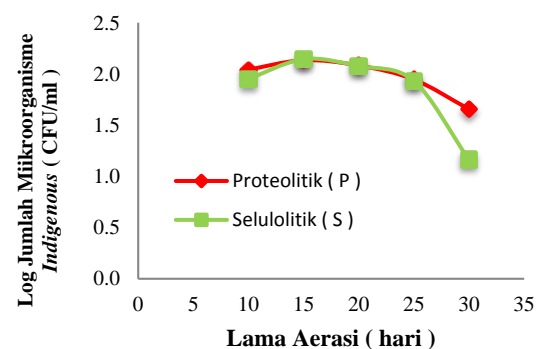
kemampuan aerasi, agitasi, evaporasi dan keterjaminan aseptis yang merupakan fungsi dasar dari fermentor agar dapat mengontrol lingkungan untuk pertumbuhan mikroba. Sistem agitasi yang digunakan pada penelitian ini menggunakan agitator non-mekanis (*air lift*) yaitu dengan memanfaatkan gelembung-gelembung udara untuk meningkatkan laju perpindahan massa menembus film pembatas antara cairan dan gelembung udara sehingga turbulensi dan efisiensi pencampuran mikroba dengan substratnya meningkat. Kondisi aseptis dilakukan dengan mengendalikan sistem pemasokan oksigen (aerasi) dan pengeluaran udara.

Pertumbuhan makhluk hidup dapat ditinjau dari 2 sudut, yakni pertumbuhan individu (sel) dan pertumbuhan kelompok sebagai satu populasi. Menurut Waluyo (2007) pada mikroorganisme, pertumbuhan individu (sel) dapat berubah langsung menjadi pertumbuhan populasi. Faktor-faktor yang mempengaruhi pertumbuhan mikroorganisme yang bersifat heterotrof adalah ketersediaan nutrisi, air, suhu, pH, oksigen, dan adanya mikroorganisme yang lain.

Pertumbuhan pada kultur *batch* dalam penelitian degradasi dan stabilisasi lumpur aktif dilakukan dengan memasukkan starter (inokulum aktif) ketiga isolat yang telah dibuat yaitu inokulum bakteri proteolitik 1, inokulum bakteri proteolitik 2, dan inokulum bakteri selulolitik yang dilakukan secara aerobik.

Populasi Mikroorganisme

Analisis mikroorganisme pada cairan stabilisasi *sludge* meliputi bakteri *indigenous* proteolitik, dan bakteri *indigenous* selulolitik. Bakteri tersebut dihitung pertumbuhan koloninya sejak ditambahkan starter hingga stabilisasi berakhir yaitu pada hari ke 10, 15, 20, 25 dan 30 mengalami penurunan (Gambar 4). Jumlah bakteri *indigenous* proteolitik dan selulolitik pada cairan stabilisasi *sludge* tertinggi pada hari ke-15 masing-masing sebesar 8.46×10^6 CFU/mL dan 8.54×10^6 CFU/mL dan terendah pada hari ke-30 sebesar 7.01×10^6 CFU/mL untuk pertumbuhan koloni bakteri *indigenous* proteolitik dan 6.96×10^6 CFU/mL untuk pertumbuhan koloni bakteri *indigenous* selulolitik.



Gambar 4 Pertumbuhan mikroorganisme spesifik pada proses stabilisasi yang diinokulasikan kultur isolat proteolitik atau selulolitik

Peningkatan jumlah bakteri *indigenous* proteolitik dan selulolitik pada selang waktu hari ke-10 dan ke-15 terjadi akibat pengaruh penambahan starter cair bakteri *indigenous* yang menyebabkan jumlah bakteri *indigenous* dengan sifat proteolitik dan selulolitik meningkat. Pada selang waktu tersebut, fase adaptasi bakteri *indigenous* akan berlangsung cepat sehingga bakteri *indigenous* langsung mengalami pertumbuhan cepat (fase eksponensial). Penurunan jumlah bakteri *indigenous* proteolitik dan selulolitik disebabkan kandungan nutrisi yang semakin sedikit pada cairan stabilisasi *sludge* sehingga pertumbuhan mikroorganisme terhambat akibat kompetisi perebutan nutrisi yang mengakibatkan bakteri berada dalam fase stasioner setelah hari ke-15 kemudian memasuki fase kematian setelah hari ke-20.

Total Gula

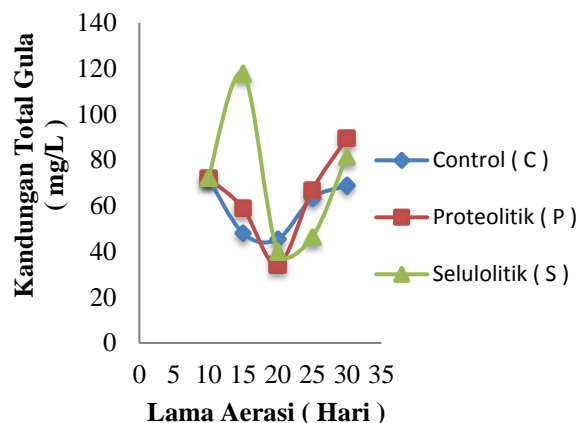
Berdasarkan informasi dari Tabel 1, menunjukkan kandungan gula sederhana di dalam *sludge* masih tinggi yaitu mencapai 347.82 mg/kg. Tingginya kandungan gula sederhana akan menyebabkan pertumbuhan mikroorganisme *indigenous* yang tidak diharapkan pada *sludge*.

Gambar 4 menunjukkan bahwa secara umum, semakin lama proses aerasi berlangsung akan terjadi penurunan jumlah koloni isolat bakteri *indigenous* yang tumbuh. Seiring dengan penurunan kandungan bakteri *indigenous* yang hidup menurun, nilai total gula cairan stabilisasi *sludge* pada lumpur aktif yang didegradasi juga terlihat mengalami penurunan. Dengan demikian lama aerasi berpengaruh terhadap total gula cairan stabilisasi *sludge*. Semakin lama aerasi, total gula semakin menurun.

Gambar 5 juga menunjukkan terjadinya perubahan pola konsumsi total gula terlarut. Pada reaktor kontrol (C) dan reaktor proteolitik (P) terlihat bahwa lama proses aerasi akan menyebabkan penurunan kandungan total gula yang dimulai pada hari ke-10 hingga hari terakhir. Sementara pada reaktor selulolitik (S) terjadi kenaikan kandungan total gula sejak hari ke-10 hingga hari ke-15, kemudian diikuti penurunan setelah hari ke-15 hingga hari ke-25, sedangkan pada hari ke-15 sampai hari terakhir diperoleh kandungan total gula mengalami penurunan kembali.

Adapun pada reaktor selulolitik (S) mengalami kenaikan kandungan total gula pada hari ke-10 hingga ke-15, apabila dibandingkan dengan reaktor kontrol. Hal ini dapat disebabkan bakteri selulolitik cenderung mengeluarkan enzim selulase untuk menguraikan selulosa dan hemiselulosa yang merupakan golongan polisakarida menjadi selobiosa (disakarida) dan glukosa sehingga menyebabkan ikut

terukur sebagai total gula. Dalam pengukuran total gula, senyawa yang terkandung merupakan gula-gula sederhana, oligosakarida dan turunannya dapat bereaksi dengan fenol dan asam sulfat pekat.



Gambar 5 Kandungan total gula cairan stabilisasi *sludge*

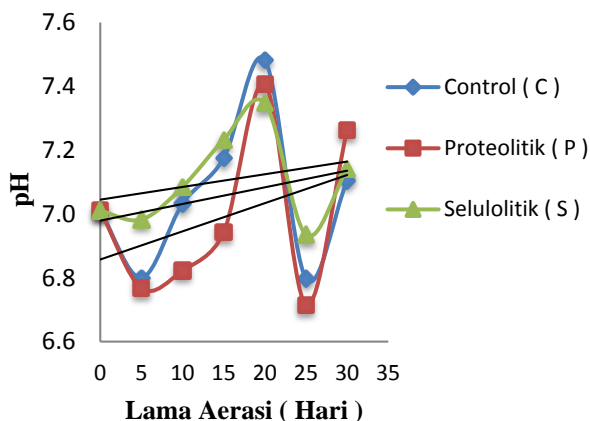
Aktivitas bakteri proteolitik dan selulolitik menunjukkan kemampuan degradasi komponen kompleks yang berasal dari bahan baku (Tabel 1) berupa 4.12% protein (b.b) dan 5.82% selulosa (b.b) berupa serat-serat kasar menjadi gula-gula yang lebih sederhana.

Menurut Mandels (1982) yang mengatakan bahwa enzim kompleks selulase yang dihasilkan oleh mikroorganisme selulolitik memiliki kemampuan untuk memecah selulosa menjadi glukosa sehingga mudah dicerna. Hemiselulosa merupakan polisakarida yang berbentuk amorf sehingga mempunyai tingkat degradasi lebih baik bila dibandingkan selulosa dan lignin. Hal ini mengakibatkan hemiselulosa di dalam bahan lebih mudah dihidrolisis oleh bakteri selulolitik. Adanya serat yang dihidrolisis ini mengakibatkan glukosa dan gula sederhana dalam bahan bertambah.

Perubahan pH

Nilai pH cairan stabilisasi *sludge* pada reaktor C, P, dan S mengalami perubahan yang cenderung stabil berada pada *range* 6.50 – 7.50 seiring dengan lama pemberian aerasi. Informasi dari Gambar 6 menunjukkan penurunan pH dapat disebabkan oleh adanya produksi asam-asam organik sebagai akibat dari proses biokimia dengan mengubah total gula terlarut menjadi asam-asam organik (Hidayat 2006).

Data total gula yang tersaji pada Gambar 5, terlihat hubungan proses biokimiawi perubahan kandungan gula menjadi asam organik. Selama proses penurunan total gula maka asam organik semakin banyak terbentuk, yang mengakibatkan penurunan nilai pH.



Gambar 6 Perubahan pH akibat aktivitas mikroorganisme

Penelitian Himanen dan Hanninen (2011) melaporkan, proses degradasi mikrobial pada *aerobic sludge* dapat menyebabkan transformasi nitrogen dari biomassa (*sludge*) menjadi senyawa amonium (NH_4^+) yang selanjutnya berubah menjadi nitrat (NO_3^-) yang akan berdampak pada berbagai aspek seperti perubahan pH, temperatur, dan C/N rasio.

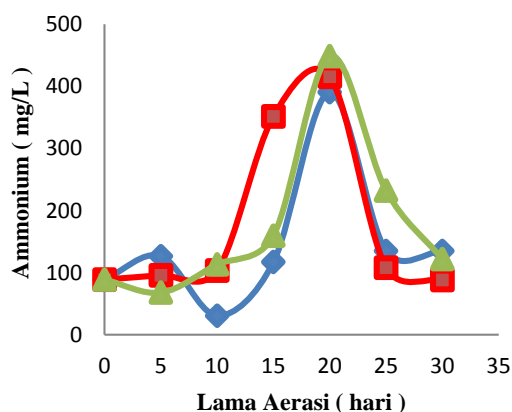
Kecenderungan naiknya nilai pH dapat diakibatkan adanya peran bakteri nitrifikasi pada *sludge* yang mulai meningkat setelah hari ke-10 hingga hari ke-20 yang kemudian mengalami kenaikan kembali setelah aerasi hari ke-25. Pola perubahan pH ini dapat dikaitkan dengan pola konsumsi amonium dan nitrat yang dilakukan oleh bakteri yang dimanfaatkan sebagai sumber nitrogen untuk pertumbuhannya. Pada mulanya, penurunan pH terjadi saat amonium dikonsumsi oleh bakteri yang disebabkan karena ion NH_4^+ bergabung dengan sel bakteri dengan melepaskan ion H^+ , selanjutnya pH mulai meningkat saat nitrat dikonsumsi oleh bakteri.

Meskipun terjadi perubahan nilai pH akibat pengaruh adanya pembentukan asam organik dan proses transformasi nitrogen (nitrifikasi), kondisi pH cairan fermentasi *sludge* masih memasuki *range* standar kondisi kinerja *sludge* yaitu 6.5-8.0 (Benefield dan Randall 1980).

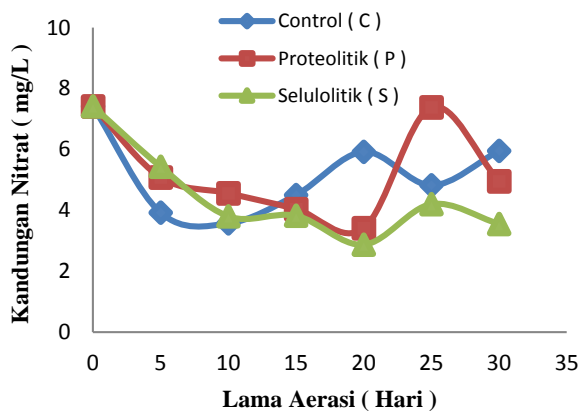
Perubahan Ammonium (NH_4^+) dan Nitrat (NO_3^-)

Nitrogen adalah senyawa yang tersebar secara luas di biosfir. Atmosfir bumi mengandung sekitar 78% gas nitrogen. Pada sistem perairan, senyawa nitrogen dapat berupa nitrogen organik dan nitrogen anorganik. Nitrogen organik berupa asam amino, protein, dan urea, sedangkan nitrogen anorganik terdiri atas amonia (NH_3), amonium (NH_4^+), nitrit (NO_2^-), nitrat (NO_3^-), dan nitrogen (N_2).

Kondisi perubahan amonium dan nitrat pada *sludge* yang tersaji pada Gambar 7, memiliki hubungan sebab akibat. Saat mulai aerasi hingga hari ke-20, nilai amonium cenderung meningkat, hal ini disebabkan senyawa nitrogen organik dalam biomassa / lumpur aktif mengalami proses amonifikasi sehingga terbentuk amonium, sehingga senyawa amonium yang meningkat akan dioksidasi menjadi nitrat yang memiliki kecenderungan menurun pada hari yang sama. Setelah hari ke-20 sampai aerasi berakhir, pola perubahan amonium mengalami peningkatan kemudian penurunan sehingga nitrat yang terbentuk semakin menurun kemudian mengalami peningkatan nitrat sampai aerasi berakhir. Pola perubahan porsi amonium juga dapat disebabkan adanya pengaruh pH selama proses nitrifikasi berlangsung. Semakin meningkat nilai pH, akan menyebabkan porsi amonia (NH_3) meningkat yang akan berdampak pada penurunan porsi amonium (NH_4^+).



(a)



(b)

Gambar 7 Transformasi nitrogen (a) ammonium – NH_4^+ menjadi (b) nitrat – NO_3^- selama proses stabilisasi *sludge*

Selama selang hari ke-20 hingga hari ke-30 terlihat bahwa reaktor kontrol (C) memiliki kecenderungan perubahan nitrat yang berbeda dengan reaktor proteolitik (P) dan selulolitik (S). Hal ini disebabkan pada hari ke-25 nitrat yang terbentuk telah mengalami perubahan menjadi nitrogen bebas (N_2), kemudian pada selang hari ke-25 hingga hari ke-30 mengalami kenaikan sebagai akibat dari masih berlangsungnya proses nitrifikasi. Penurunan nilai nitrat menandakan nitrat mulai tereduksi / tereliminasi. Kenaikkan nilai nitrat yang disertai dengan penurunan ammonium mengindikasikan bahwa proses nitrifikasi berlangsung efektif.

Penelitian Okuman (2009) melaporkan proses penyisihan nitrogen dalam stabilisasi *sludge* yang dilakukan oleh mikroorganisme *indigenous* dimulai dari tahapan degradasi *sludge* dengan mengubah karakteristik dari *sludge* (biomassa) menjadi ammonium, kemudian diubah menjadi nitrat dan menguap menjadi nitrogen bebas sebagai hasil dari proses stabilisasi. Hal ini mengindikasikan bahwa stabilisasi *sludge* turut menyediakan sumber karbon untuk dipakai sebagai aktivitas pendegradasian yang akan berjalan lambat selama periode stabilisasi.

Gambar 7 menunjukkan terjadinya proses pendegradasian yang berjalan lambat setelah hari ke-20 diakibatkan adanya penurunan aktifitas degradasi akibat terjadi kematian sel dan proses pembusukkan. Penelitian Himanen dan Hanninen (2010) menjelaskan bahwa proses stabilisasi secara aerobik akan mempengaruhi persaingan dengan mikroorganisme yang lebih dominan populasinya, dengan pertimbangan adanya persaingan populasi mikroorganisme untuk melakukan respirasi.

Menurut Snape (1995), proses transformasi nitrogen terjadi setelah proses transformasi fosfor. Nitrogen merupakan nutrisi terpenting setelah fosfor yang dapat menjadi faktor pembatas pada air. Ketersediaan nitrogen dalam air diasumsikan sebagai *dissolved nitrogen*, ion ammonium, nitrat, nitrit, yang merupakan penyusun nitrogen dalam komponen organik. Sebagaimana yang ditunjukkan pada Nitrogen yang terdapat di atmosfer dapat dibentuk oleh mikroba yang hidup dalam air dan tanah, dan dapat terlepas ke atmosfer melalui proses denitrifikasi yang dilakukan oleh bakteri denitrifier.

Penelitian Kim *et al.* (2002) melaporkan selama proses stabilisasi *sludge* biologis menggunakan *aerobic digestion* berlangsung, nitrogen yang tersisihkan akan menjadi lebih rendah daripada penyisihan VSS. Hal ini disebabkan asam amino yang

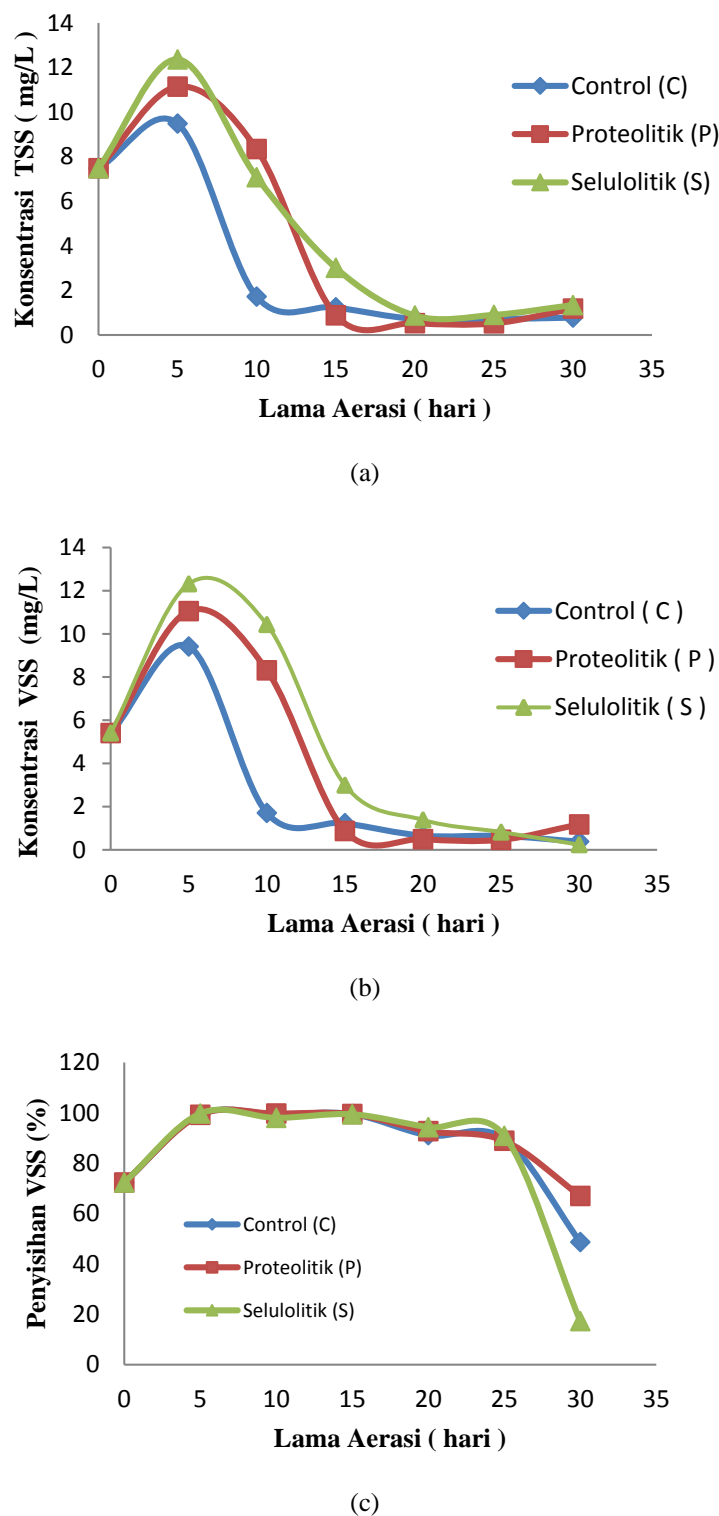
telah terbentuk selama proses stabilisasi *sludge* diubah menjadi ammonium dan nitrat dan sebagian besar diuapkan menjadi senyawa volatil berupa nitrogen bebas dan VFA (*Volatile Fatty Acid*) yang merupakan hasil samping dari proses perubahan biokimiawi nitrogen.

Penurunan *Suspended Solids* (TSS dan VSS)

Pada penelitian ini, dilakukan pengujian nilai VSS dan TSS sebagai parameter yaitu pengukuran performa dari stabilisasi *sludge* dalam mengetahui besarnya penyisihan fraksi organik dan anorganik yang terkandung. Secara umum cairan stabilisasi *sludge* yang tersaji pada Gambar 8, memiliki nilai TSS dibawah 30 mg/L sesuai dengan Peraturan Gubernur Provinsi DKI Jakarta Nomor 122 tahun 2005. Hal ini menandakan proses stabilisasi *sludge* mampu melakukan penyisihan nilai TSS dengan baik.

Konsentrasi TSS dan VSS pada selang aerasi hari ke-0 hingga hari ke-5 mengalami kenaikan. Hal ini dapat terjadi akibat proses penyesuaian mikroorganisme *indigenous* dalam lingkungan yang baru. Akibatnya proses flokulasi biologis yang terjadi secara spontan masih belum optimal. Sehingga, biomassa mikroba *indigenous* masih tersuspensi dalam cairan *sludge*.

Penurunan konsentrasi TSS dan VSS pada 3 perlakuan yang diberikan, mulai terjadi pada hari ke-10. Tingkat penurunan konsentrasi komponen organik pada TSS dan VSS yang paling cepat mencapai kestabilan *sludge* secara berturut-turut terjadi pada reaktor kontrol (C) kemudian reaktor proteolitik (P) dan reaktor selulolitik (S). Hal ini dapat terjadi karena pada reaktor kontrol proses degradasi dilakukan secara alami oleh konsorsium mikroorganisme *indigenous* yang terlarut sehingga reaktor kontrol lebih cepat mencapai kestabilan yang dimulai setelah hari ke-15. Sedangkan kondisi penyisihan pada reaktor proteolitik dan selulolitik memiliki kecepatan penyisihan yang lebih rendah dibandingkan pada reaktor kontrol karena pada penurunan dari hari ke-10. Hal ini dapat disebabkan, pemberian starter bakteri proteolitik dan selulolitik mulai diberikan pada waktu tersebut, sehingga starter bakteri *indigenous* tersebut masih dalam tahap fase penyesuaian (adaptasi).



Gambar 8 Pengaruh lama aerasi terhadap (a) konsentrasi TSS, (b) konsentrasi VSS, dan (c) penyisihan VSS selama stabilisasi *sludge*.

Benefield dan Randall (1980) menjelaskan didalam pengukuran effektivitas kinerja stabilisasi *sludge* dapat diasumsikan bahwa tingkat pembusukkan atau degradasi material organik yang diplotkan sebagai nilai *volatile suspended solid* (VSS) dan *total suspended solid* (TSS) akan mengalami penurunan (degradasi

senyawa organik) hingga mencapai kestabilan selama proses aerasi berlangsung. Material organik pada akhir proses stabilisasi dinyatakan sebagai fraksi organik yang merupakan penurunan nilai VSS (mg/L) dari kandungan TSS yang teroksidasi pada saat pembakaran 500-600°C. Sehingga meninggalkan residu berupa fraksi anorganik

(abu).Fraksi padatan anorganik yang terukur merupakan sejumlah sel mikroorganisme *indigenous* yang telah mati (pada *sludge*) yang akan diperoleh ketika mencapai maksimum stabilisasi (pada 15-20 hari).

Gambar 8 menunjukkan hubungan antara konsentrasi TSS (a) dan konsentrasi VSS (b) dengan membandingkan rasio penyisihan VSS (c). Pola penyisihan padatan organik (suspensi *sludge*) cenderung mengalami penurunan sejak hari ke-5 hingga ke-15, kemudian mengalami kestabilan setelah hari ke-15 hingga stabilisasi berakhir. Efektivitas degradasi *sludge* terendah terjadi pada perlakuan stabilisasi dengan penambahan starter bakteri selulolitik pada konsentrasi TSS awal sebesar 7.48 mg/L yang menurun menjadi 1.18 mg/L saat periode stabilisasi berakhir (hari ke-30).

Adapun rasio penyisihan VSS pada stabilisasi *sludge* menggunakan starter cair bakteri selulolitik, memiliki penurunan VSS/TSS dari 72.3% (hari ke-0) hingga mencapai penyisihan 17.3%. Artinya pada hari ke-30 bakteri selulolitik hanya mampu mendegradasi komponen organik sebesar 17.3% dari total padatan terlarut, sedangkan rasio penyisihan VSS hari ke-30 untuk perlakuan kontrol sebesar 48.7% serta rasio penyisihan VSS pada perlakuan dengan penambahan starter bakteri proteolitik sebesar 67.0% kemampuan mendegradasi bahan organik. Pada perlakuan stabilisasi dengan penambahan starter bakteri proteolitik memiliki tingkat penyisihan tertinggi yang disebabkan adanya pembentukan asam-asam amino dari aktivitas bakteri proteolitik.

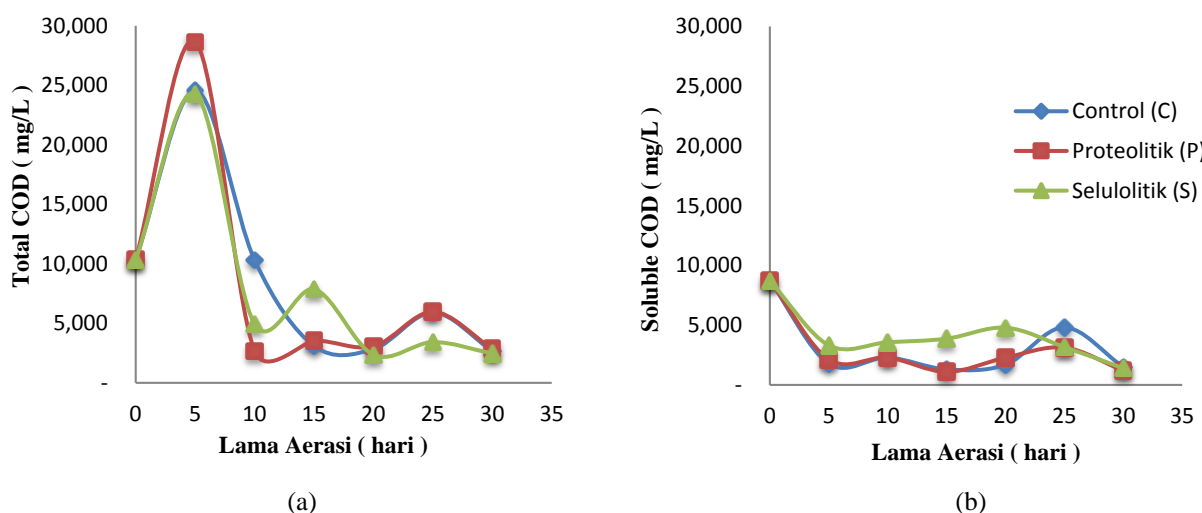
Penelitian Liu *et al.* (2011) menjelaskan bahwa penyisihan VSS dipengaruhi oleh adanya senyawa VFA (*Volatile Fatty Acid*) termasuk diantaranya asam butirat yang terbentuk. Pembentukan VFA berlangsung dalam *biochemical metabolite pathway* dengan mengurai protein menjadi asam amino yang kemudian mengalami proses deaminasi sehingga terbentuk VFA.

Perubahan Nilai *Chemical Oxygen Demand* (COD)

Chemical Oxygen Demand (COD) atau Kebutuhan Oksigen Kimia merupakan salah satu metode untuk mengukur jumlah material organik (karbon organik total non aromatik) yang terlarut dalam suatu larutan. Pada umumnya air limbah memiliki kandungan oksigen yang rendah. Hal ini terjadi karena oksigen yang terlarut di dalam air limbah tersebut diserap oleh mikroorganisme *indigenous* untuk memecah atau mendegradasi bahan organik.

Penelitian Okuman (2009) menjelaskan konsentrasi biomassa awal dari lumpur aktif dapat diidentifikasi dari nilai mg sel COD/L. Konsentrasi biomassa awal pada penelitian stabilisasi *sludge* (Gambar 10) total COD sebesar 10350 mg COD/L dan *soluble* COD sebesar 8713 mg COD/L yang terus mengalami penurunan hingga proses stabilisasi berakhir.

Gambar 9 menunjukkan semakin lama waktu aerasi semakin turun nilai total COD. Hal ini menunjukkan bahwa total COD yang dihasilkan mulai tersisihkan akibat degradasi yang dilakukan oleh mikroorganisme *indigenous* dengan memecah senyawa organik kompleks menjadi senyawa yang lebih sederhana. Selain itu, mikroorganisme *indigenous* juga melakukan metabolisme secara aerobik dengan menghasilkan CO₂. Meskipun demikian, pada hari ke-5 nilai total COD baik pada reaktor kontrol, proteolitik, dan selulolitik mengalami kenaikan yang disebabkan proses adaptasi mikroba *indigenous* terhadap lingkungan baru sehingga aktivitas mikroba tersebut masih belum berjalan normal. Adapun nilai *soluble* COD menunjukkan semakin lama proses aerasi berlangsung, semakin bertambah nilai COD. Peningkatan nilai *soluble* COD yang didapat dari sampel suspensi lumpur yang sudah disaring akan mengurangi kejenuhan dalam suspensi sehingga menyebabkan kandungan oksigen terlarut meningkat.



Gambar 9 Transformasi (a) total COD dan (b) *soluble* COD selama proses aerasi berlangsung

Potensi Aplikasi Stabilisasi *Sludge*

Pada penelitian ini, penerapan *aerobic digester* dengan menambahkan starter cair bakteri *indigenous* proteolitik dan selulolitik maupun dalam bentuk konsorsium (sebagai kontrol) mampu mendegradasi *sludge* dengan mengubah karakteristik dari *sludge* tersebut yaitu kandungan gula, ammonium, nitrat, TSS, VSS, dan COD yang mulai tersisih hingga proses stabilisasi berakhir. Hal ini mengindikasikan bahwa, proses degradasi dan stabilisasi turut menyediakan sumber karbon untuk dipakai sebagai aktifitas pendegradasian selama periode stabilisasi. *Sludge* sebagai hasil dari proses stabilisasi dapat berpotensi untuk dikembangkan menjadi pupuk cair yang berasal dari pemanfaatan cairan *sludge* (Tabel 2). Hasil perbandingan komponen hara makro pada *sludge* sebelum stabilisasi dan sesudah stabilisasi tersaji pada Tabel 2.

Perubahan kandungan kalium menurun setelah stabilisasi *sludge* berakhir. Penurunan ini menunjukkan bahwa aktifitas mikroba *indigenous* mampu memanfaatkan kalium yang terlarut untuk dikonsumsi. Kandungan kalium terendah terjadi pada stabilisasi *sludge* dengan perlakuan penambahan starter bakteri selulolitik. Sedangkan kenaikan nilai nitrogen dan fosfor terjadi akibat adanya perombakan komponen organik kompleks oleh mikroba *indigenous*.

Ditinjau dari pengujian nilai TSS dan VSS pada Gambar 8, menunjukkan *sludge* yang selesai distabilisasi memiliki kandungan TSS dan VSS yang rendah dan stabil. Hal ini menunjukkan bahan organik yang terkandung sudah tersisihkan. Kandungan TSS yang rendah memungkinkan *sludge* yang sudah distabilkan dapat berpotensi untuk dimanfaatkan menjadi pupuk cair. Secara keseluruhan berdasarkan informasi dari Tabel 2, hasil stabilisasi *sludge* terbaik adalah stabilisasi dengan penambahan starter cair bakteri selulolitik *indigenous*, mempunyai nilai C/N rasio mendekati 10.00 menurut Permentan/No. 70/SR.140/10/2011 tentang spesifikasi pupuk cair organik. Hal ini disebabkan, nilai C/N rasio pada pupuk harus sama dengan C/N rasio tanah agar memudahkan

unsur hara pada pupuk dapat terserap dengan baik (Djuarnani *et al.* 2005).

Dengan demikian, stabilisasi dengan penambahan starter cair bakteri selulolitik *indigenous* siap untuk dikembangkan sebagai bahan baku pupuk. Di dalam proses pengembangan *sludge* yang telah distabilkan untuk menjadi bahan baku pupuk, harus dilakukan formulasi kembali untuk pemenuhan unsur nitrogen, fosfor, hara mikro, serta unsur lainnya yang disesuaikan dengan standar yang telah ditentukan oleh Permentan (2011) tentang persyaratan teknis minimal pupuk cair organik yang tercantum pada Tabel 2.

Nitrogen, fosfor, dan kalium merupakan unsur hara makro yang dibutuhkan oleh mikroorganisme *indigenous* dalam sistem lumpur aktif sebagai nutrisi untuk pertumbuhannya. Penelitian Fitrahani (2012), menjelaskan efektifitas lumpur aktif ditentukan dari ketepatan pemberian input nutrisi (urea, fosfor) pada sistem lumpur aktif untuk mencegah terjadinya eutrofikasi akibat kelebihan nitrogen, fosfor, dan unsur kelumit yang digunakan mikroba untuk sintesis sel. Proses pemberian nutrisi inilah yang menyebabkan lumpur mengandung unsur hara makro berupa N, P, K.

Pentingnya *sludge* manajemen dilakukan untuk memastikan jumlah kandungan logam, patogen, dan polutan organik yang diharapkan. Berbagai macam usaha dalam mengatasi penumpukkan *sludge* yang terbentuk selama proses pengolahan air limbah telah diterapkan oleh beberapa negara maju. Penelitian Snape (1995) melaporkan penanganan *sludge* hasil instalasi pengolahan air limbah telah dilakukan sebanyak 60-95% industri di negara EU (*European Union*) menerapkan metode stabilisasi *sludge*.

Hal ini menunjukkan bahwa pengolahan lumpur menggunakan stabilisasi *sludge* sudah banyak dilakukan di negara maju. Davis (2010) menambahkan, proses stabilisasi *sludge* mampu menghilangkan senyawa toksik dan mengeliminasi senyawa yang menimbulkan aroma tidak sedap. Disamping itu, proses stabilisasi dapat menghilangkan senyawa organik yang akan memacu terjadinya eutrofikasi. Sehingga opsi melakukan stabilisasi *sludge* untuk manajemen *sludge* pada jangka panjang, yang harus memenuhi syarat sebagai berikut (Okuman 2009): *eco-friendly*, ekonomis, dan dapat diterima oleh masyarakat.

Tabel 2. Hasil analisis *sludge* sebelum dan sesudah stabilisasi

Parameter	Satuan	Sebelum	Sesudah Stabilisasi			Persyaratan Teknis Pupuk Cair Permentan (2011)
		Stabilisasi	Kontrol	Selulolitik	Proteolitik	
Nitrogen	% b.b	0.0083	0.0069	0.0119	0.0191	3-6
Fosfor	% b.b	0.0023	0.1819	0.0129	0.0289	3-6
Kalium	% b.b	2.4220	1.622	0.0823	0.1292	3-6
C/N Ratio	-	7.4700	8.9700	9.1700	7.1200	10-20

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Stabilisasi *sludge* menggunakan *aerobic sludge digester* dapat dimanfaatkan untuk mendegradasi komponen senyawa organik kompleks pada lumpur dari pengolahan secara biologis (lumpur aktif atau *biosolids*). Isolat bakteri *indigenous* yang terpilih adalah bakteri *indigenous* yang memiliki sifat proteolitik dan selulolitik serta memiliki laju pertumbuhan yang tinggi. Proses pendegradasian oleh mikroorganisme *indigenous* mampu menyisihkan senyawa nitrogen berupa amonium menjadi nitrat kemudian nitrogen bebas yang ditunjukkan dari adanya penurunan porsi amonium ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$) dan kenaikan porsi nitrat ($\text{NH}_3 - \text{N}$) pada reaktor kontrol (C), reaktor dengan penambahan starter isolat proteolitik (P), dan reaktor dengan penambahan starter isolat selulolitik (S) yang akan menyebabkan kenaikan pH. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa semua perlakuan dengan penambahan starter bakteri *indigenous* mempunyai kemampuan untuk mempercepat degradasi komponen organik yang tinggi, akan tetapi penambahan starter tidak berpengaruh nyata dalam mempercepat waktu proses stabilisasi. Penambahan starter bakteri proteolitik meningkatkan tingkat konversi protein menjadi amonium, sedangkan penambahan starter bakteri selulolitik mampu meningkatkan penyisihan nilai *total suspended solids* (TSS), *volatile suspended solid* (VSS), *total COD*, dan *soluble COD* dibandingkan dengan kontrol. Penambahan starter bakteri selulolitik mampu menghasilkan rasio C/N yang lebih tinggi (9.17) dibandingkan dengan perlakuan lainnya (7.12 – 8.97).

Saran

Sludge yang diperoleh dari proses stabilisasi diperoleh cairan dari penyisihan *sludge*, dapat dikembangkan menjadi pupuk cair. Oleh karena itu, dalam pengembangannya masih perlu diformulasi ulang agar dapat memenuhi standar pupuk cair.

DAFTAR PUSTAKA

- AOAC. 1994. *Official Methods of Analysis of The Association Official Analytical Chemist*. Washington D.C.
- _____. 1995. *Official Methods of Analysis of The Association of Analytical Chemist*. Washington D.C.
- APHA. 2005. *21th Standar Methods For The Examination of Water and Wastewater*. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation.
- [BSN] Badan Standarisasi Nasional. 2004. *Spesifikasi Pupuk dari Sampah Organik Domestik*. SNI 19-7030-2004.
- Al-Ghusain I, Mohamed FH, Mohamed AG. 2001. Nitrogen transformations during aerobic/anoxic sludge digestion. *Int J Bior Tech Res*. 85 : 147-154.

- Benfield LD, Randall CW.** 1980. *Biological Process Design for Waste Water Treatment*. Prentice – Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J.
- Davis ML.** 2010. *Water and Wastewater Engineering – Design Principles and Practice (Profesional Ed.)*. United States of America : McGraw-Hill Companies, Inc.
- Djuarnani N, Kristian, Budi SS.** 2005. Field – scale modelling of carbon and nitrogen dynamics in soil amended with urban waste composts. *Agric Ecosyst Environ.* 110 : 289-299.
- Eckenfelder WW.** 2000. *Industrial Water Pollution Control 3rd ed.* United States of America (US) : McGraw-Hill Companies, Inc.
- Fitrahani, LZ.** 2012. *Karakterisasi Kondisi Operasi dan Optimasi Instalasi Pengolahan Air Limbah Industri Pangan*. [Skripsi]. Bogor (ID) : Institut Pertanian Bogor.
- Hidayat N, Masdiana CP.** 2006. *Mikrobiologi Industri*. Yogyakarta (ID): Penerbit ANDI.
- Himanen M, Hanninen K.** 2010. Composting of bio waste, aerobic and anaerobic sludge – effect of feedstock on the process and quality of compost. *Int J Biores Tech Res.* 102 : 2842-2852.
- Kim SH, Kim WJ, Chung TH.** 2002. Release characteristics of nitrogen and fosforus in aerobic and intermittent aerobic sludge digestion. *Korean J. Chem Eng.* 19 : 439-444.
- Liu S, Nanwen Z, Loretta Y.** 2011. The one-stage autothermal thermophilic aerobic digestion for sewage sludge treatment : Stabilization process and mechanism. *Int J Biores Tech Res.* 104 : 266-273.
- Mandels, MR.** 1982. *Cellulase*. In: D.Pearlman [editorial]. *Annual Reports on Fermentation Process.* 5: 39-44.
- Okuman TD.** 2009. Respirometric Assesment of Aerobic Sludge Stabilization. *Int J Biores Tech Res.* 101 : 2592-2599
- Peraturan Menteri Pertanian.** 2011. *Persyaratan Teknis Minimal Pupuk Cair Organik*. Permentan/No. 70/SR.140/10/2011.
- Rittmann BE, McCarty.** 2001. *Environmental Biotechnology – Principles and Applications*. Massachutes (US) : McGraw – Hill Companies, Inc.
- Snappe JB.** 1995. *Dynamics of Environmental Bioprocesses: Modelling and Simulation*. New York, NY (USA): VCH Publishers, Inc.
- Stanbury PF, Whitaker A.** 1984. *Principles of Fermentation Technology*. UK : Pergamon Press.
- [USEPA] US Environmental Protection Agency.** 1989. *Stabilization / Solidification of CERCLA and RCRA Wastes*. Washinton D.C (US) : Center for EPA.